УДК 681.518.52:622.53

В.Н. Павлыш, И.В. Тарабаева
ГВУЗ « Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, Украина
Украина, 83050, г. Донецк, ул. Артема, 131, pavlyshvn@mail.ru

Исследование стохастических характеристик процесса обезвоживания сыпучих материалов в «кипящем слое» методом вычислительного эксперимента

V.N. Pavlysh, I.V. Tarabayeva
Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine
Ukraine, 83050, Donetsk, Artyoma st., 131

The Investigation of Random Characters of Quicksand Materials Drying Process in «Boiling Layer» by Method of Computer Experiment

В.М. Павлиш, І.В. Тарабаєва
ДВНЗ « Донецький національний технічний університет», м. Донецьк, Україна
Україна, 83050, м.Донецьк, вул. Артема, 131

Дослідження стохастичних характеристик процесу зневоднення сипких матеріалів у «киплячому шарі» методом обчислювального експерименту

В данной работе рассматривается задача применения метода вычислительного эксперимента к исследованию процесса сушки сыпучих материалов в «кипящем слое» как вероятностного явления. На основе использования математических моделей диффузионно-переносного движения, нагрева и обезвоживания частиц исследованы вероятностные характеристики времени пребывания, температур и степени обезвоживания материала в «псевдоожиженном» слое. Полученные результаты показывают преимущества способа по сравнению с другими технологиями.
Ключевые слова: процесс, параметр, температура, технология, математическая модель.

In given work the problem of application of computer experiment for investigation of quicksand materials drying process in «boiling layer» as random phenomenon is considered. On the base of application of mathematical models of inject-transfer moving, heating and water-extracting the random parameters of existing time, temperature and drying degree of material in pseudo-liquid layer was investigated. The obtained results show the preference of methods compared with another technologies.
Keywords: process, parameter, temperature, technology, mathematical model.

У даній роботі розглядається задача застосування методу обчислювального експерименту до дослідження процесу сушіння сипучих матеріалів в «киплячому шарі» як імовірнісного явища. На основі використання математичних моделей дифузійно-переносного руху, нагрівання і зневоднення частинок досліджені імовірнісні характеристики часу перебування, температур і ступені зневоднення матеріалу у «псевдозрідженому» шарі. Отримані результати показують переваги способу в порівнянні з іншими технологіями.
Ключові слова: процес, параметр, температура, технологія, математична модель.

Введение

Особенностью технологического процесса обработки материалов в псевдоожиженном слое является случайная природа времени пребывания частиц в рабочей зоне, обусловленная хаотическими движениями и соударением частиц.

В работах В.Н. Ткаченко [1-4], обобщающих теоретические результаты ряда авторов, в частности В.В. Кафарова [5], Г. Крамера [6] и других, предложен метод вычислительного эксперимента для исследования стохастических параметров процесса воздействия на материалы в кипящем слое. Применение данного метода дает дополнительные возможности идентификации математических моделей процессов обезвоживания сыпучих материалов в псевдоожиженном слое. Вычисление показателей плотности распределения частиц по времени пребывания в псевдоожиженном слое.

Для моделирования процесса изменения концентрации частиц в псевдоожиженном слое используется математическая модель диффузии частиц в конвективном потоке [1], [5]. Уравнения моделируемого процесса имеют вид:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v\frac{\partial C}{\partial X} \qquad (1)$$

$$D\frac{\partial C(0,\tau)}{\partial X} = vC \qquad (2)$$

$$\frac{\partial C(L,\tau)}{\partial X} = 0 \qquad (3)$$

$$C(0,X) = C_0(X)\,, \qquad (4)$$

где

C(x,τ) – безразмерная концентрация частиц в точке x, в момент времени τ;

D – коэффициент диффузии частиц в слое;

v – расходная скорость потока;

C0(X) – начальная концентрация частиц.

Для реализации математической модели (1) – (4) на ЭВМ могут быть использованы конечно-разностные методы с явной или неявной схемой аппроксимации и их модификации [1], [7-9]. С помощью метода расщепления модель (1) – (4) может быть представлена элементарными физическими процессами (диффузией и переносом массы), для расчета которых накоплен значительный опыт. Простейшей для реализации на ЭВМ является явная схема, в соответствии с которой краевая задача представляется в виде следующей конечно-разностной:

$$\frac{C_{j+1}^L - C_j^L}{h_\tau} = D\frac{C_j^{L+1} - 2C_j^L + C_j^{L-1}}{h_X^2} - v\frac{C_j^L - C_j^{L-1}}{h_X} \qquad (5)$$

$$\frac{C_j^1 - C_j^L}{h_X} = \frac{v}{D}C_j^0 \qquad (6)$$

$$C_j^n - C_j^{n-1} = 0 \qquad (7)$$

$$C(X_L,0) = C_0^L\,, \qquad (8)$$

где $C_j^L - C(X_L,\tau), h_X = L/n, X^L = Lh_X, L = 0,n; \tau_j = jh_\tau, j = 0,1,...$

Шаг по времени hτ выбирается из условия устойчивости, которое получено по основе анализа уравнения (5) и имеет следующий вид:

$$h_\tau < \frac{h_X^2}{2D + vh_X}.$$

Конечно-разностное уравнение (5) аппроксимирует исходное уравнение по схеме односторонней разности против потока с первым порядком точности по переменным X,τ. Для определения параметров конечно-разностной схемы (hx , hτ) отладки алгоритмов расчета краевой задачи удобно пользоваться интегральными характеристиками процесса, основанными на законах сохранения массы.

При равномерно распределенной загрузке материала для больших коэффициентов диффузии (D > 0,01) режим движения частиц соответствует идеальному перемешиванию, а закон распределения частиц по времени пребывания близок к экспоненциальному. При малых же коэффициентах диффузии (D ≤ 0,01) плотность распределения частиц превращается в функцию, напоминающую arctg, причем, чем меньше D, тем длиннее площадка равномерной плотности и распределение стремится к прямоугольному. Проведены исследования вероятностных характеристик времени пребывания в диапазоне значений коэффициентов диффузии, полученных опытным путем для различных материалов, обрабатываемых в псевдоожиженном слое [1], [5]. В табл. 1 приведены результаты численного исследования вероятностных характеристик времени пребывания частиц в рабочей камере при различных значениях параметров процесса.

Таблица 1 – Зависимость вероятностных характеристик времени пребывания частиц от величины коэффициента диффузии

Среднее время пребывания τт (мин)	Коэфф. диффузии D 104, (м2 / с)			
	1	3	5	10
10	18,8	19,6	17,7	8,6
	2,3	3.7	3,8	3,4
	0,12	0,30	0,23	0,26
20	18,7	22,7	13,3	16,5
	3,8	5,5	4,9	12,1
	0,12	0,23	0,27	0,55
30	23,3	17,8	10,6	5,3
	5,4	6,1	9,5	3,6
	0,19	0,33	0,41	0,55
40	32,4	14,8	8,9	4,4
	12,6	6,3	4,3	3,5
	0,21	0,35	0,45	0,59

В ячейках таблицы первое значение обозначает математическое ожидание, второе – среднеквадратичное отклонение, третье – коэффициент вариации.

В результате исследования установлено, что математическое ожидание времени пребывания частицы в активной зоне составляет более 11 мин, в переходной зоне – более 13 мин, что подтверждает как результаты моделирования, так и положение о том, что сушка в «кипящем слое» обеспечивает более длительный контакт материала с сушильным агентом по сравнению с барабанными сушилками, трубами-сушилками и другими схемами, и по этой причине является наиболее эффективной современной технологией обезвоживания.

Исследование температуры и степени обезвоживания частиц в псевдоожиженном слое как стохастических величин.

В простейшей одномерной постановке основные процессы теплообмена описывается следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$v_s(1-\varepsilon)C_{\rho s}(T)\frac{\partial T_s}{\partial X}=\lambda_s\frac{\partial^2 T_s}{\partial X^2}+\alpha_V(T_g-T_s)$$
$$v_g\varepsilon C_\rho(T)\frac{\partial T_g}{\partial X}=a_V(T_g-T_s)+\frac{K^{\Sigma p}}{F}(T_g-T_{окр}) \quad (9)$$

$$0<X<L, 0<t<t_k \quad (10)$$

$$\lambda_s\frac{\partial T_s(r,0)}{\partial X}=v_s(1-\varepsilon)C_{\rho s}(T_s-T_s^0), \quad (11)$$

$$-K_s\frac{\partial T_s(R,X)}{\partial r}=v_s(1-\varepsilon)C_{\rho s}(T_s-T_s^L), \quad (12)$$

$$T_g(L)=T_g^0. \quad (13)$$

Характерной особенностью математического моделирования теплообмена в противотоке является тот факт, что известными оказываются, как правило, температуры материала и газа на входе, задаваемые на разных концах зоны теплообмена. При численном интегрировании системы (9) – (13), начиная в точке x = 0, либо в обратном направлении при x = L, оказываются неизвестными Tg(0), либо Ts. Целью математического моделирования работы реактора является расчет функции Ts(X), Tg(X), для X: 0 < X < L и значения температуры материала на выходе – для заданных расходных скоростей vs, vg. Для расчета требуемых величин необходимо решить некоторую краевую задачу, для чего дополним систему уравнений (9) – (13) начальным условием для температуры газа Tg(0) в точке x = 0, таким, чтобы при интегрировании системы получить равенство рассчитанной в точке x = L температуры газа Tgr (L) заданной начальным условием (13):

$$T_g^r(L)=T_g^0.$$

Определение начального условия Tg(0), для которого выполняется равенство (13), сводится к нахождению корня некоторого уравнения, заданного алгоритмически. С этой целью система уравнений аппроксимируется какой-либо конечно-разностной схемой, обеспечивающей достаточно высокую точность расчета искомых функций [8], после чего решение краевой задачи может быть получено одним из численных методов поиска корней алгебраических и трансцендентных уравнений (методы Ньютона, хорд, деление отрезка пополам и др.).

Расчет вероятностных характеристик осуществляется в едином алгоритме интегрирования краевой задачи, на каждом шаге которого накапливаются суммы требуемых величин, умноженных на плотность распределения.

На основе законов распределения частиц по времени пребывания, полученных с помощью диффузионной модели, исследованы вероятностные характеристики температур и степени обезвоживания частиц в псевдоожиженном слое. Представляет практический интерес установить, в каких пределах среднего квадратического отклонения времени пребывания, а значит, и при каких значениях коэффициента диффузии, равенство $M[T(\tau)]=T(m_\tau)$ все же можно считать приближенно выполняющимся.

В табл. 2 приведены вероятностные характеристики температур и степени обезвоживания частиц в диапазоне значений коэффициентов диффузии, полученных опытным путем для различных материалов, обрабатываемых в псевдоожиженном слое [5]. С увеличением коэффициента диффузии растет среднее квадратическое отклонение (с.к.о.) времени пребывания при неизменном его математическом ожидании ($m\tau$ = 40 мин). При этом изменяются не только дисперсии, но и математические ожидания всех характеристик частицы, что подтверждает нелинейность соответствующих функциональных зависимостей. Степень нелинейности различных характеристик частицы существенно отличается.

Таблица 2 – Вероятностные характеристики температур и степени обезвоживания частиц при различных значениях коэффициента диффузии и законах распределения времени пребывания

Коэффициент диффузии м2 / с	С.к.о. времени пребывания (мин)	Температура поверхности частицы (°С)	Среднемассовая температура (°С)	Степень обезвоживания частицы (%)
0,0	0	94,5	62,5	82
0,0001	8,3	95,4 --------- 4,1	72 --------- 5,3	81 --------- 4,4
0,0003	10,8	95,2 ----------- 5,9	71 --------- 7,8	80 ---------- 5,7
Аппроксимация нормальным законом распределения				
0,0003	8,6	95,2 ---------- 7,3	71 --------- 7,5	82 --------- 7,6
0,0005	12,6	95,2 --------- 8,3	91 7.9	80 --------- 7,5
0,0010	17,5	95 --------- 8,2	90 --------- 10,4	79 --------- 9,9
Режим идеального смещения (экспоненциальный закон)				
∞	40,0	98 ---------- 18,2	89 ----------- 16,1	68 ---------- 13,8

Примечание. В таблице над разделительной чертой указана величина математического ожидания, под разделительной чертой – среднее квадратическое отклонение случайной величины.

Максимальной нелинейностью обладает степень обезвоживания частицы. При $D < 0{,}0001$ (соответственно $\sigma\tau \leq 7$ минут) вероятностный расчет с допустимой погрешностью можно заменить детерминированным расчетом температур и степени обезвоживания. При $D > 0{,}0003$ ($\sigma\tau \leq 10$ минут) игнорирование случайного характера времени пребывания частиц приводит уже к существенным погрешностям в численной оценке степени обезвоживания частицы.

Проведен вычислительный эксперимент с аппроксимацией плотности распределения времени пребывания, полученной при D = 0,0003 (строка 4 табл. 2), нормальной плотностью для одинаковых значений математического ожидания и дисперсии.

Сравнение результатов расчета вероятностных характеристик температур и степени обезвоживания частиц позволяет сделать вывод, что в классе унимодальных законов распределения частиц по времени пребывания математические ожидания характеристик частиц зависят от математического ожидания и дисперсии времени пребывания частиц и практически не зависят от моментов более высокого порядка, тогда как дисперсии зависят еще и от асимметрии и эксцесса. Практически это означает, то при оценке степени обезвоживания по заданным математическому ожиданию и дисперсии времени пребывания частиц и неизвестной плотности распределения, последнюю можно считать нормальной.

Выводы

Анализ вероятностных характеристик показывает, что при движении материала из зоны в зону дисперсия времени пребывания частиц нарастает, однако медленнее, чем его математическое ожидание, в связи с чем коэффициент вариации времени пребывания уменьшается, при этом закон распределения стремится к нормальному (асимметрия и эксцесс уменьшаются с увеличением числа пройденных зон).

Сравнение результатов расчета вероятностных характеристик температур и степени обезвоживания частиц позволяет сделать вывод, что в классе унимодальных законов распределения частиц по времени пребывания математические ожидания характеристик частиц зависят от математического ожидания и дисперсии времени пребывания частиц и практически не зависят от моментов более высокого порядка, и это позволяет при оценке степени обезвоживания по заданным математическому ожиданию и дисперсии времени пребывания частиц плотность распределения можно считать нормальной.

Список литературы

1. Ткаченко В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов : монография / Ткаченко В.Н. – Киев : Наукова думка, 2008. – 243 с.
2. Гавриленко Б.В. Регулирование тепловой производительности котлоагрегата с топкой кипящего слоя в условиях рециркуляции дымовых газов / Б.В. Гавриленко, С.В. Неежмаков // Автоматика 2002 : матеріали Міжнародної конференції з управління, (Донецьк, 16 – 20 вересня 2002 р.). – Донецьк, 2002. – Т 1. – С. 190.
3. Ткаченко В.Н. Планирование теплофизического эксперимента по нагреву массивных тел в технологическом потоке / В.Н. Ткаченко // Электронное моделирование. – 1997. – Т. 1.– С. 64-70.
4. Ткаченко В.Н. Численный анализ вероятностных характеристик температурных процессов обработки материала в псевдоожиженном слое / В.Н. Ткаченко // Инженерно-физический журнал. – 1997. – Т. 70.– С. 924-929.
5. Кафаров В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В.В. Кафаров, М.Б. Глебов. – М.: «Высшая школа», 1991.– 399 с.: илл.
6. Крамер Г. Математические методы статистики / Г. Крамер. – М: Мир, 1975. – 648 с.: илл.
7. Мацевитый Ю.М. Обратные задачи теплопроводности: в 2-х т: – Киев: «Наукова думка», 2003. Т.1 / Ю.М. Мацевитый. – 406 с. Т. 2 / Ю.М. Мацевитый. – 392 с.
8. Самарский А.А. Численные методы решения обратных задач математической физики / А.А. Самарский, П.Н. Вабишевич. – М.: Эдиториал УРСС, 2004.– 480 с.: илл.
9. Регуляризующие алгоритмы и априорная информация / [Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г.] – М.: «Наука», 1983.– 198 с.: илл.

References

1. Tkachenko V.N. Matematicheskoe modelirovanie, identifikacija i upravlenie tehnologicheskimi processami teplovoj obrabotki materialov : monografija / Tkachenko V.N. – Kiev : Naukova dumka, 2008. – 243 s.
2. Gavrilenko B.V. Regulirovanie teplovoj proizvoditel'nosti kotloagregata s topkoj kipjashhego sloja v uslovijah recirkuljacii dymovyh gazov / B.V. Gavrilenko, S.V. Neezhmakov // Avtomatika 2002 : materiali Mizhnarodnoї konferencії z upravlinnja, (Donec'k, 16 – 20 veresnja 2002 r.). – Donec'k, 2002. – T 1. – S. 190.
3. Tkachenko V.N. Planirovanie teplofizicheskogo jeksperimenta po nagrevu massivnyh tel v tehno¬logicheskom potoke / V.N. Tkachenko // Jelektronnoe modelirovanie. – 1997. – T. 1.– S. 64-70.
4. Tkachenko V.N. Chislennyj analiz verojatnostnyh harakteristik temperaturnyh processov obrabotki materiala v psevdoozhizhennom sloe / V.N. Tkachenko // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. – 1997. – T. 70.– S. 924-929.
5. Kafarov V.V. Matematicheskoe modelirovanie osnovnyh processov himicheskih proizvodstv / V.V. Kafarov, M.B. Glebov. – M.: «Vysshaja shkola», 1991.– 399 s.: ill.
6. Kramer G. Matematicheskie metody statistiki / G. Kramer. – M: Mir, 1975. – 648 s.: ill.
7. Macevityj Ju.M. Obratnye zadachi teploprovodnosti: v 2-h t: – Kiev: «Naukova dumka», 2003. T.1 / Ju.M. Macevityj. – 406 s. T. 2 / Ju.M. Macevityj. – 392 s.
8. Samarskij A.A. Chislennye metody reshenija obratnyh zadach matematicheskoj fiziki / A.A. Samarskij, P.N. Vabishevich. – M.: Jeditorial URSS, 2004.– 480 s.: ill.
9. Reguljarizujushhie algoritmy i apriornaja informacija / [Tihonov A.N., Goncharskij A.V., Stepanov V.V., Jagola A.G.] – M.: «Nauka», 1983.– 198 s.: ill.

RESUME

V.N. Pavlysh, I.V. Tarabayeva

The Investigation of Random Characters of Quicksand Materials Drying Process in «Boiling Layer» by Method of Computer Experiment

Background: In given work the problem of application of computer experiment for investigation of quicksand materials drying process in «boiling layer» as random phenomenon is considered. On the base of application of mathematical models of inject-transfer moving, heating and water-extracting the random parameters of existing time, temperature and drying degree of material in pseudo-liquid layer was investigated. The obtained results show the preference of methods compared with another technologies.

Materials and methods: The investigation is devoted to solution of a problem of perfection of methods of theoretical investigation and grounding of parameters of process of drying of pour materials using method of "boiling layer", provided effectiveness of technology and quality of projecting. Presented the new mathematical models of determined type, experimental investigations had be done. The main parameters of drying equipment was investigated by computer experiments.

Methodical recommendation for applying of theoretical result are described.

Results: The Main result called on authors of the article is presented by strategic direction in the field of development of technology of drying quicksand materials on the base of application «boiling layer» way.

Conclusion: The comparison investigation of parameters of drying process of moist quicksand material in "boiling layer" on mathematical models and in real conditions was provided. Proof, that mathematical models of determined type, based on mathematical physics equations, with satisfy level of precision attracts character of process and may be recommend for application.

Статья поступила в редакцию 03.06.2014.